

福島第一原発事故に伴う 海洋汚染に関する研究

日本原子力研究開発機構
小林 卓也

発表内容

1. 放射性Csの環境への放出量推定
2. 海洋拡散シミュレーションによる再現計算
3. 堆積物モニタリング
4. ^{137}Cs の環境への放出量と存在量
5. まとめ

東京電力福島第一原子力発電所事故

- 2011年3月11日に発生した東日本大震災により被災した福島第一原発における格納容器ベント、水素爆発等により、大量の放射性物質が環境中に放出
 - 放射性物質は大気放出により地表面や海表面へ沈着
- 原子炉及び使用済燃料貯蔵プールの冷却のために外部から注水した結果、一部の水が格納容器から漏出し、原子炉建屋やタービン建屋内部の溜まり水となった
 - 一部の放射性物質が海洋へ流出

環境への放出量、存在量、現存量 (JAEAによる推定値)

(PBq, P=10¹⁵)

	Cs-137	Cs-134
大気放出量* (2011年3月～5月)	14.5 PBq	14.5 PBq
海洋放出量** (2011年3月～6月)	3.5 PBq	3.5 PBq
大気から陸面への沈着量* (2011年3月～5月)	4.3 PBq	4.0 PBq
大気から海面への沈着量* (2011年3月～5月)	10.0 PBq	9.4 PBq
堆積物中の存在量*** (2011年3月～10月)	0.2 PBq	0.2 PBq
海水中の存在量 (2016年、事故から約5年後)	12 PBq	2.4 PBq

*Katata et al., 2015. **Kobayashi et al., 2013. ***Otosaka and Kato, 2014.

各研究機関による放出量推定値

Table 1 Source estimates for ^{137}Cs from the Fukushima Daiichi nuclear power plants

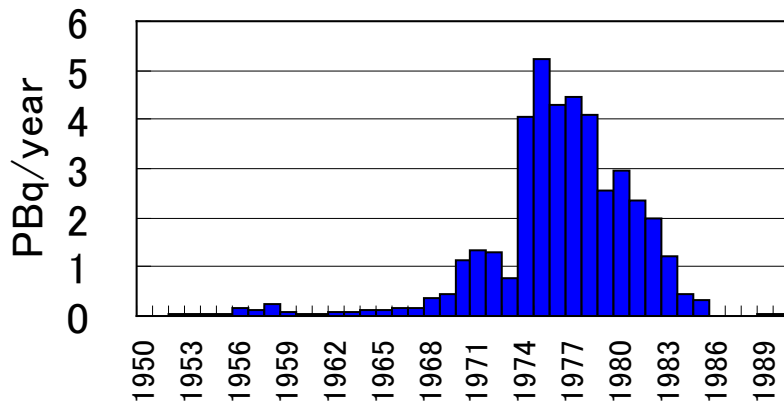
Reference	Total atmospheric fallout (PBq)	Atmospheric fallout on ocean (PBq)	Direct discharge to ocean (PBq)	Total in North Pacific (PBq)
Chino et al. 2011	13			
Katata et al. 2012	11			
Mathieu et al. 2012	20.6			
Stohl et al. 2012	36 (23–50)			
Terada et al. 2012	8.8			
Kobayashi et al. 2013	13	7.6	3.5	
Saunier et al. 2013	15.5			
Winiarek et al. 2014	19.3			
Katata et al. 2015	14.5	10.0	3.5	13.5
Kawamura et al. 2011		5	4	
Bailly du Bois et al. 2012		11.5	27 ± 15	
Estournel et al. 2012		5.8 ± 0.1	4.3 ± 0.2	
Tsumune et al. 2012, 2013			3.5 ± 0.7	
Charette et al. 2013			13.5 ± 2.5	
Miyazawa et al. 2013			5.6 ± 0.2	
Rypina et al. 2013			16.2 ± 1.6	
Aoyama et al. 2016	15.2–20.4	11.7–14.8		15.2–18.3
Inomata et al. 2016				15.3 ± 2.6
Tsubono et al. 2016		10.5 ± 0.9		16.1 ± 1.4

総放出量推定及び他の事象との比較(PBq, P=10¹⁵)

		¹³⁷ Cs (PBq)	¹³⁴ Cs (PBq)
放出量	大気 (3/12 - 5/1)	14.5	14.5
	海洋 (3/26 - 6/30)	3.5	3.5
沈着量	陸	4.3	4.0
	海	10.0	9.4
太平洋への総供給量		13.5	12.9

短期間に
環境中へ放出

(Katata et al., 2015)

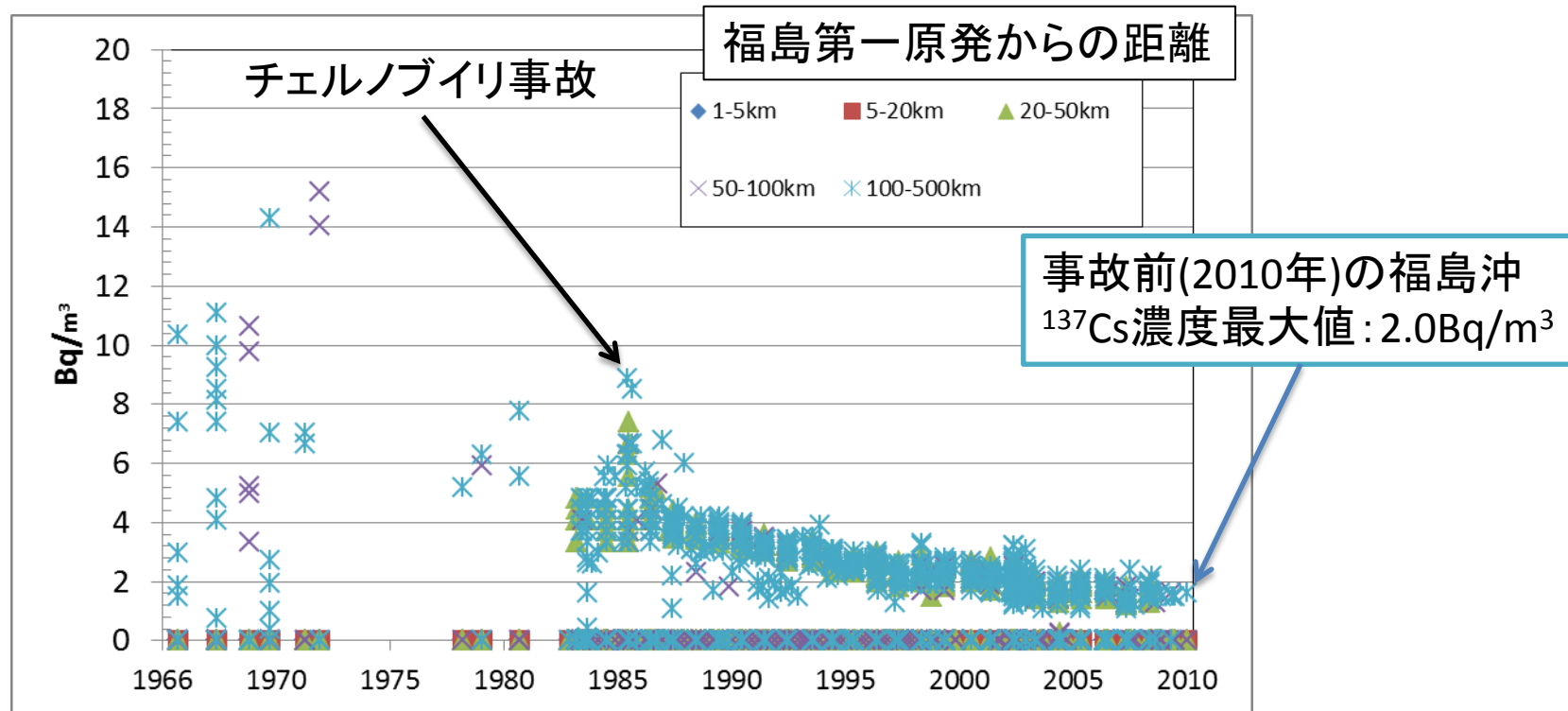


英国の再処理施設からアイリッシュ海へ放出された ¹³⁷Cs の年間放出率 (Smith et al., 2003)

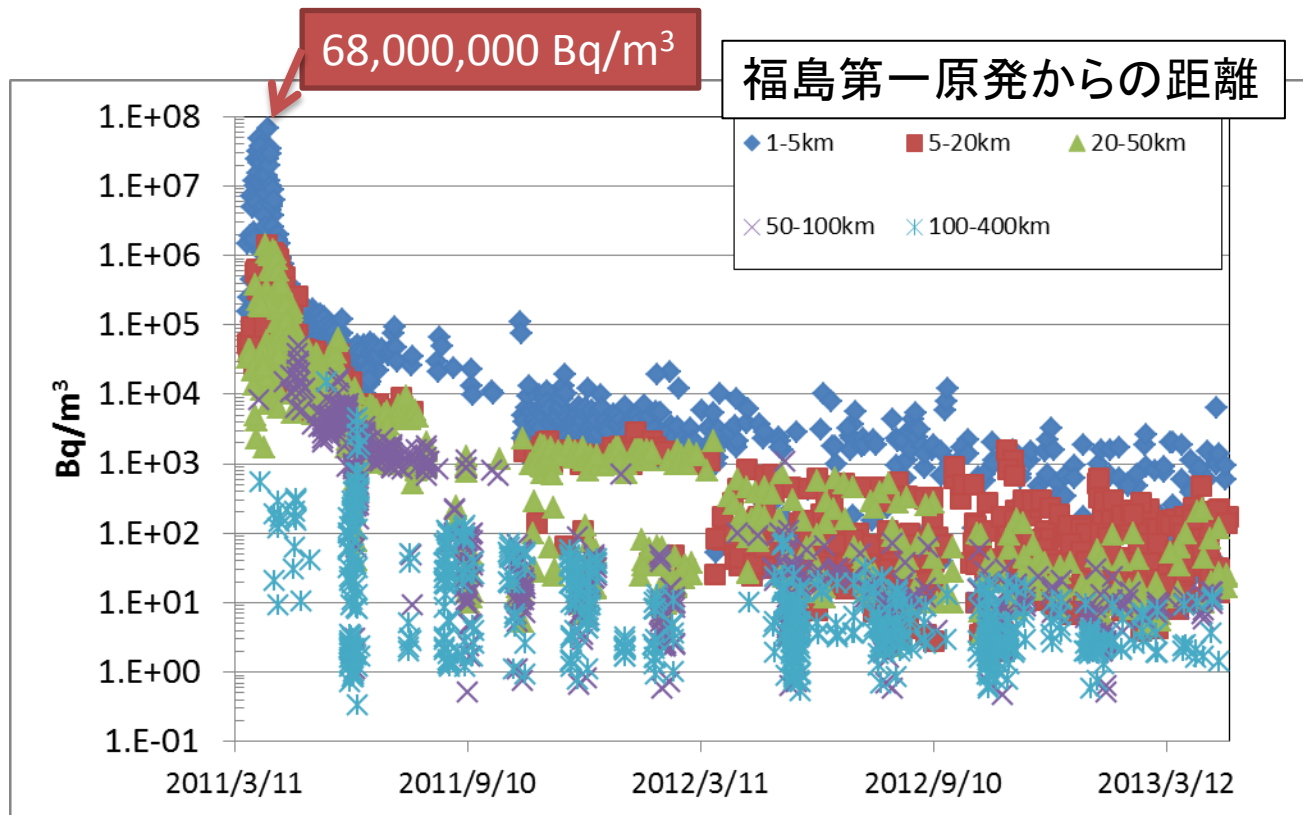
海洋放出
英国再処理施設
Cs-137 最大放出年(1975): 5.2 PBq/y
1950-1990合計: 41 PBq
旧ソ連・ロシア海洋投棄(~1984年)
合計 液体廃棄物: 1.3 PBq
固体廃棄物: 0.8 PBq

海洋直接放出を¹³⁷Csについて見ると、英国再処理施設から海洋へ放出された年間放出率の最大値よりは少なく、旧ソ連・ロシアによる海洋投棄の総量より多い。ただし、**短期間に高濃度の放射性物質が放出された前例のない事故**である。

事故前の海水中Cs-137濃度

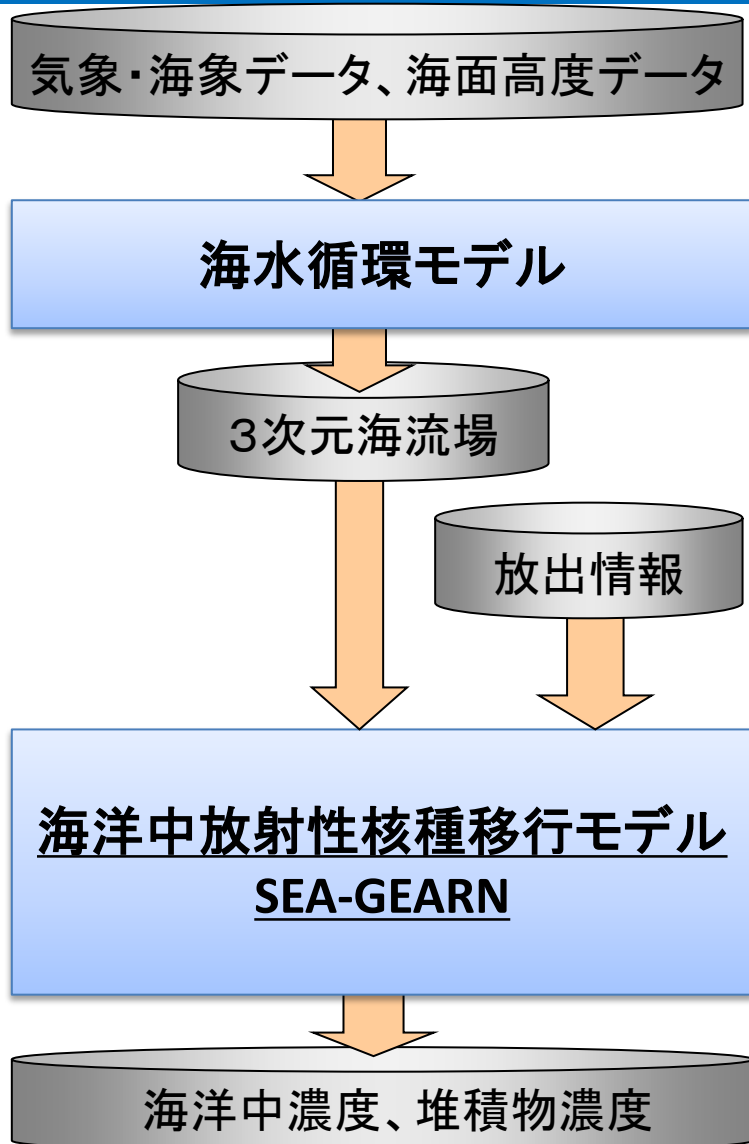


事故後の海水中Cs-137濃度



データ提供: 福島大学 青山教授

海洋拡散シミュレーションによる再現計算

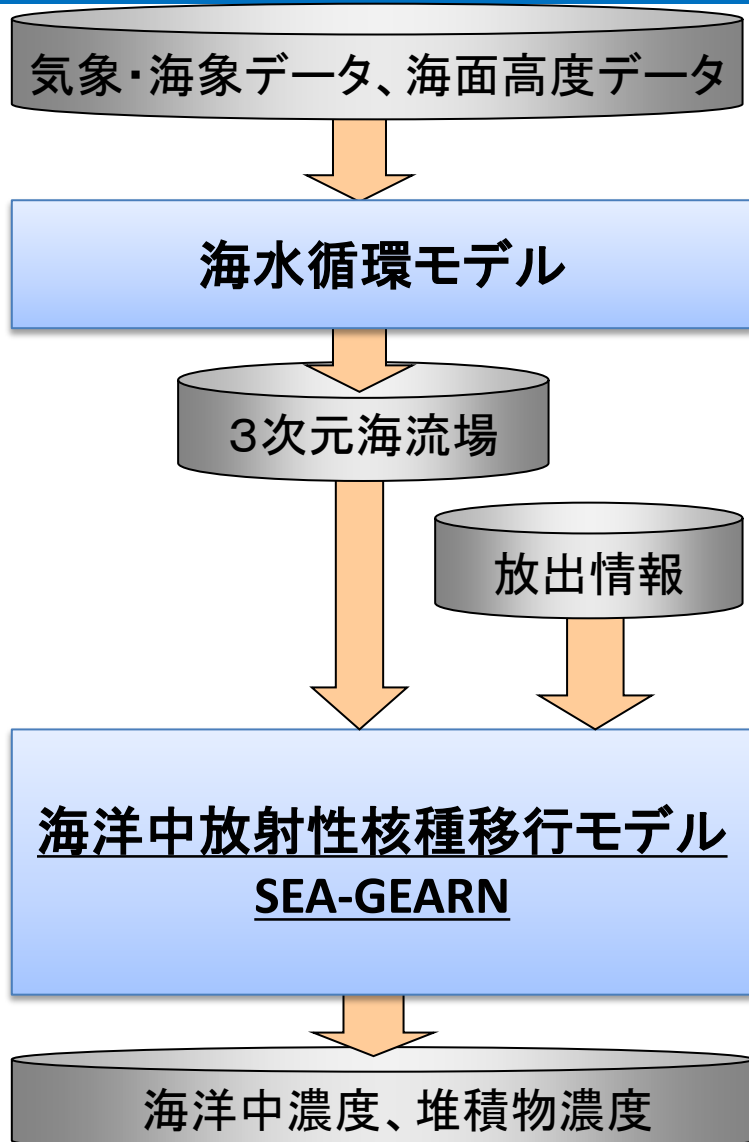


海水循環モデル

- データ同化手法*による現実的な再解析値・予報値の計算を実行
- 沿岸と広域のモデルを使用
 - 沿岸モデル
 - 京都大学、日本海洋科学振興財団、海洋研究開発機構が開発
 - 青森県六ヶ所沖の予報システムを福島沖に適用
 - 水平解像度 1.5km
 - 広域モデル
 - 気象研究所が開発
 - 気象庁の現業予報システム
 - 水平解像度 10km

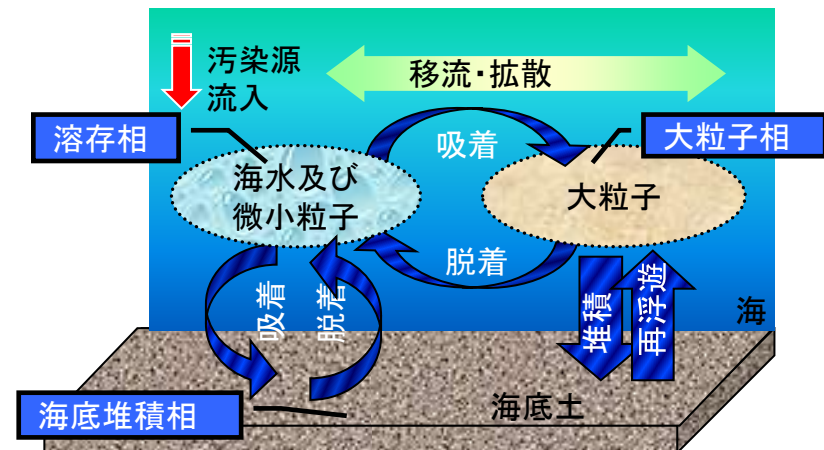
* 観測データをモデル計算に融合する手法

海洋拡散シミュレーションによる再現計算



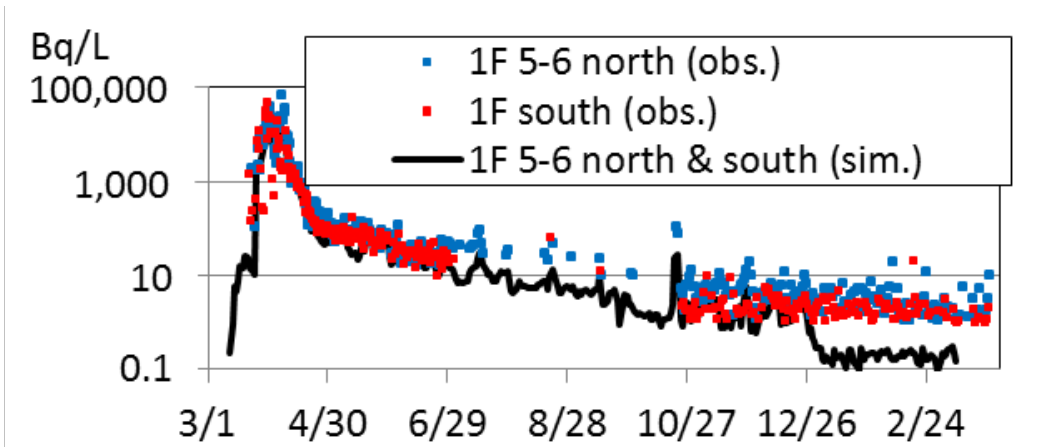
海洋中放射性核種移行モデル (SEA-GEARN(シーゲルン))

- 吸脱着モデル
- 粒子拡散モデル(多数の仮想粒子の位置を追跡)
- 海洋への推定放出率+大気からの沈着を考慮
- 2011年3月から1年間計算
- 対象核種: Cs-137

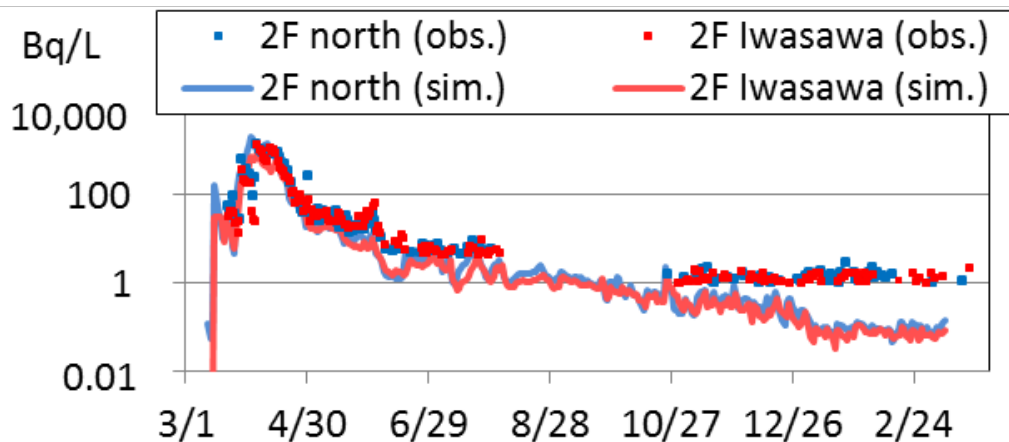


* 観測データをモデル計算に融合する手法

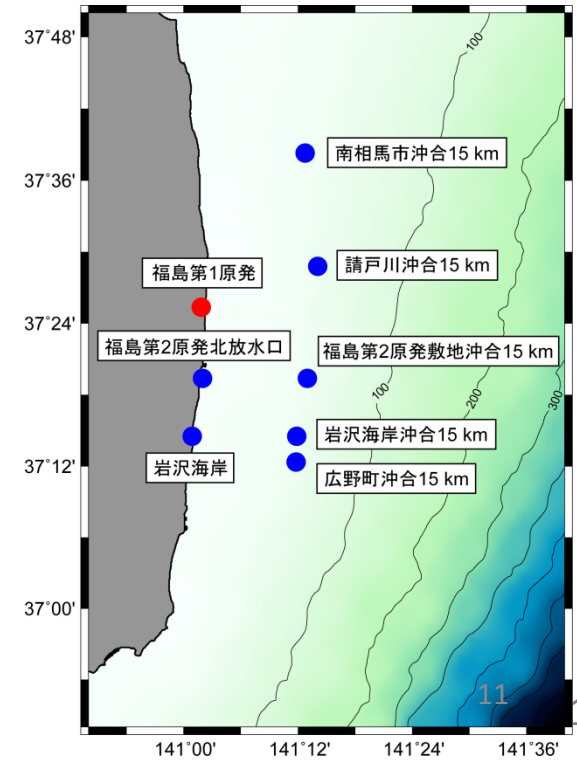
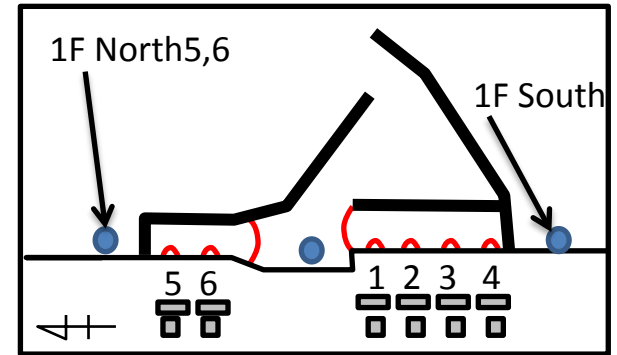
モデルの妥当性検証： モニタリング値との比較 (Cs-137)



福島第一原発近傍の表層¹³⁷Cs濃度

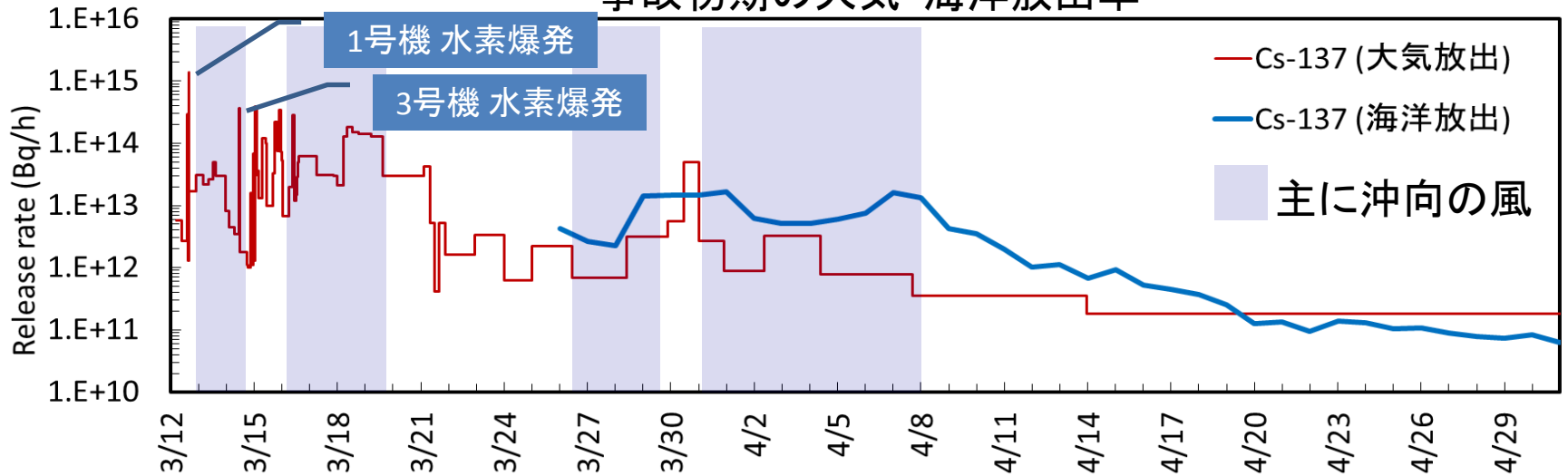


福島第一原発から12, 20km南の表層¹³⁷Cs濃度

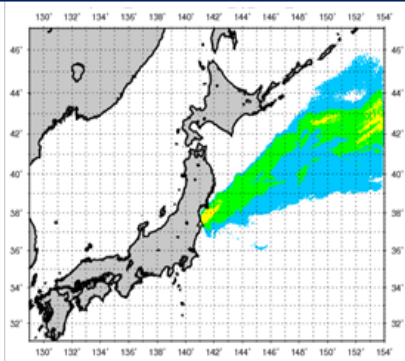


海洋への放出：大気からの沈着

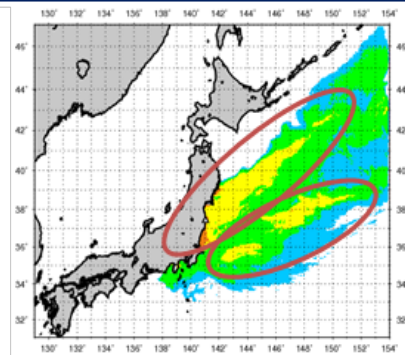
事故初期の大気・海洋放出率 a, b



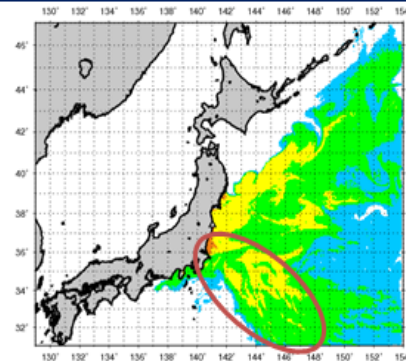
a Kobayashi et al., 2013; b Katata et al., 2015



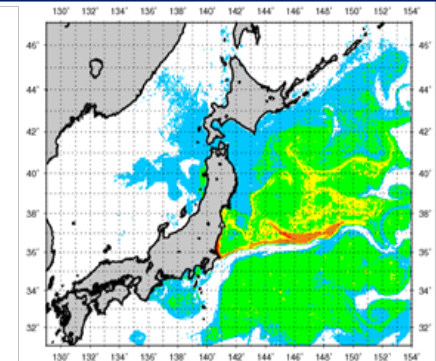
(a) 3/14



(b) 3/16

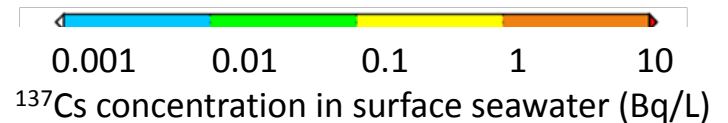


(c) 3/18



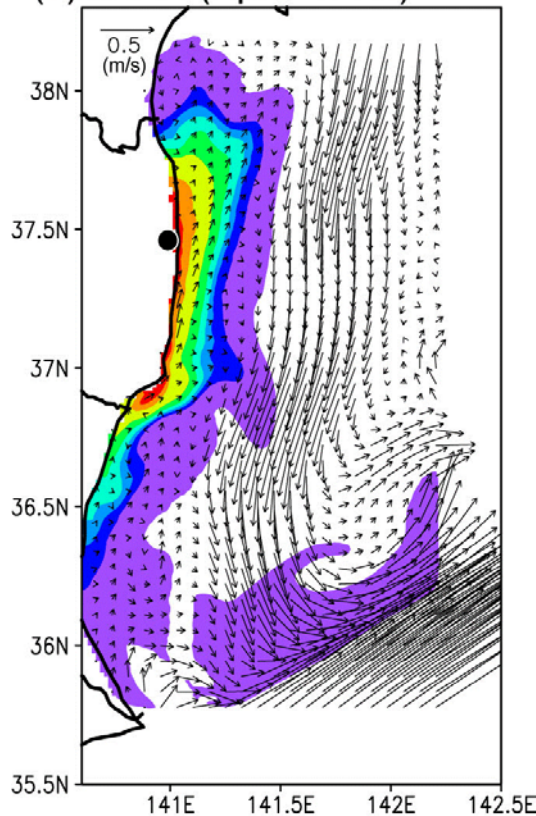
(d) 4/28

表層海水中の ^{137}Cs 濃度分布の
シミュレーション結果

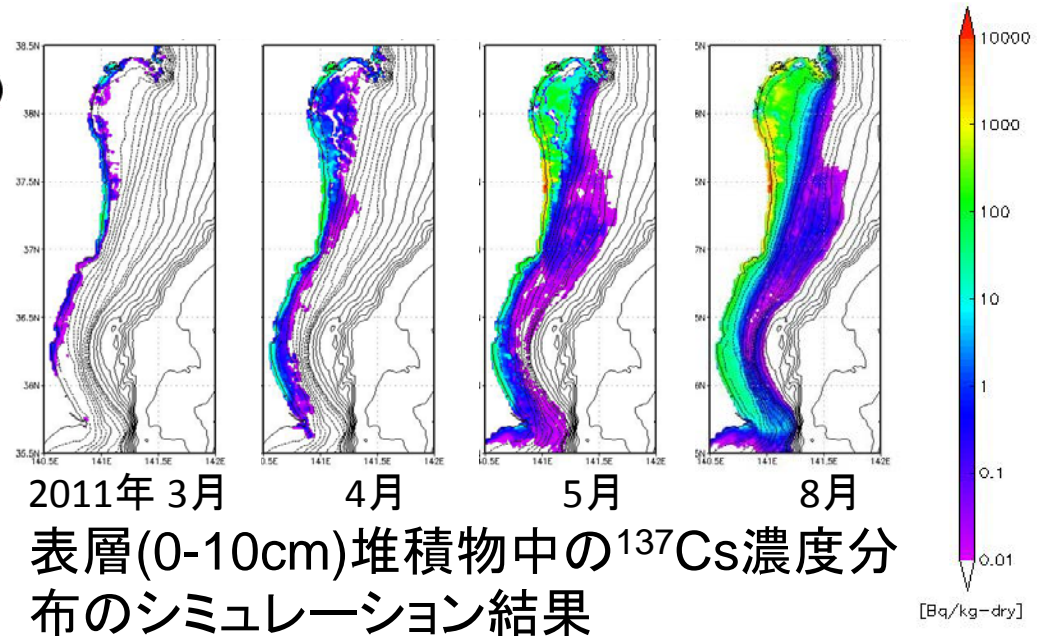


1F事故直後の ^{137}Cs 溶存態表層、堆積物中濃度

(b) JAEA (April 21-29)

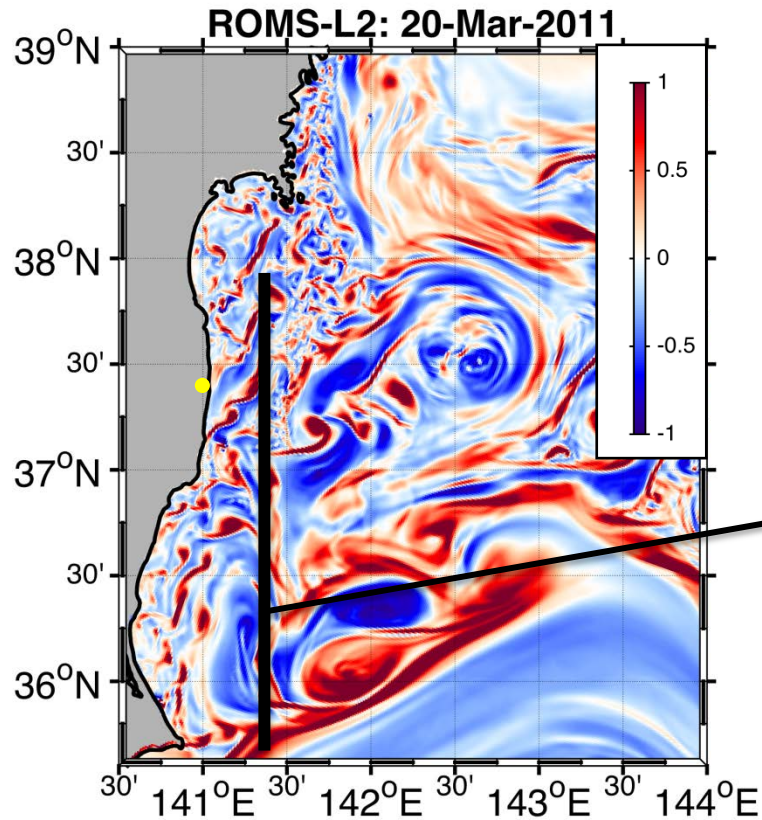


2011年4月下旬の
表層海水中的 ^{137}Cs 濃度分布の
シミュレーション結果

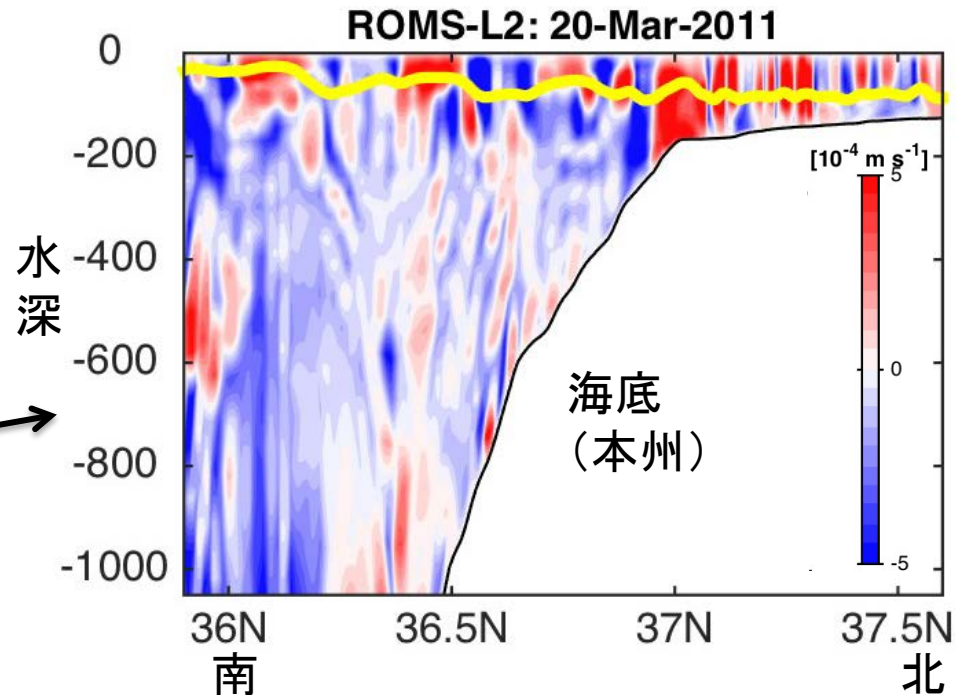


- 溶存態: 施設から直接海洋に放出された放射性セシウムは、沿岸に沿って南下し、黒潮続流に伴って東方に移動
- 堆積物: 溶存態Csの堆積物への直接接触により濃度上昇、8月までに固定

沿岸における表層海水の堆積層への直接接触について



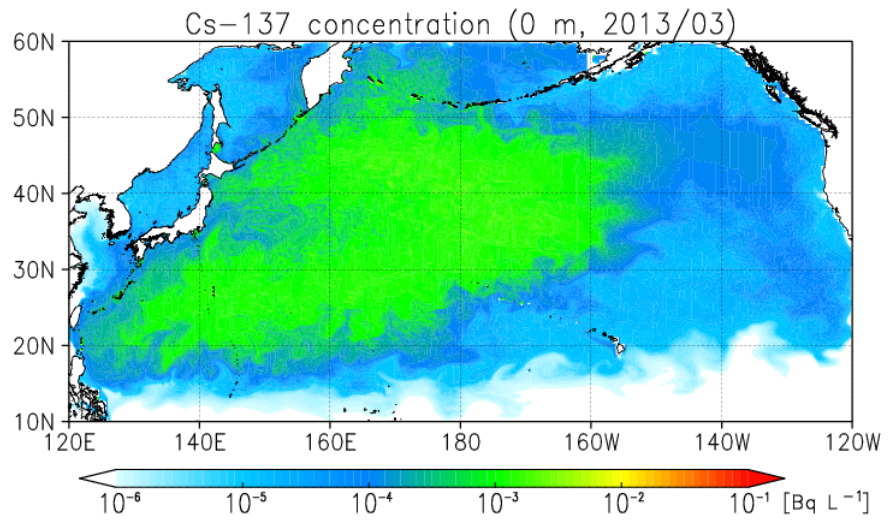
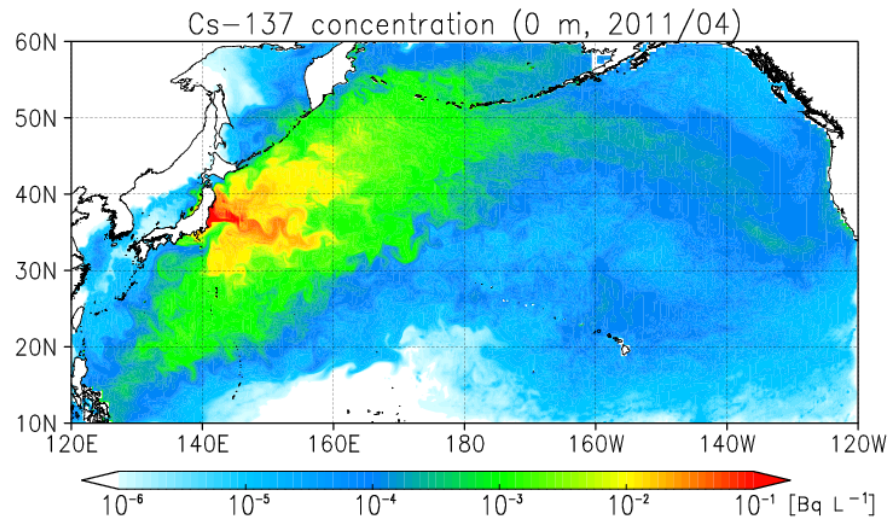
海表面無次元相対渦度 (ζ / f)



鉛直流速の鉛直断面

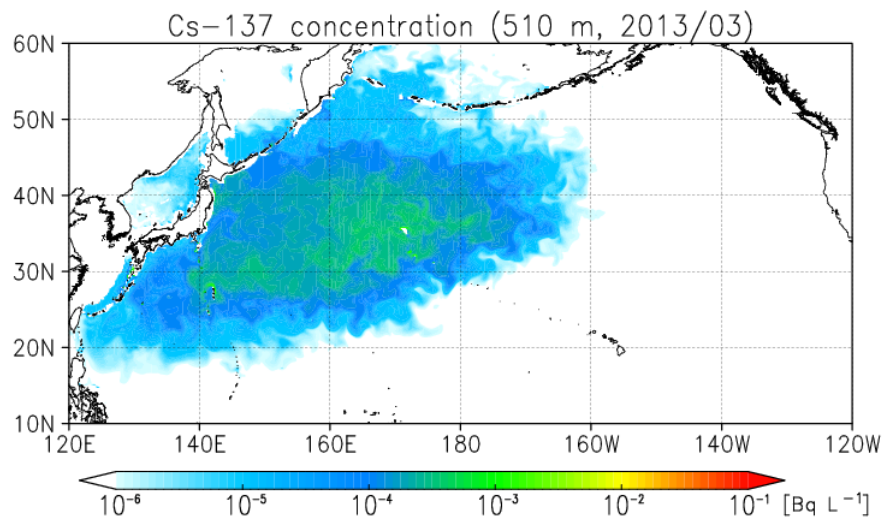
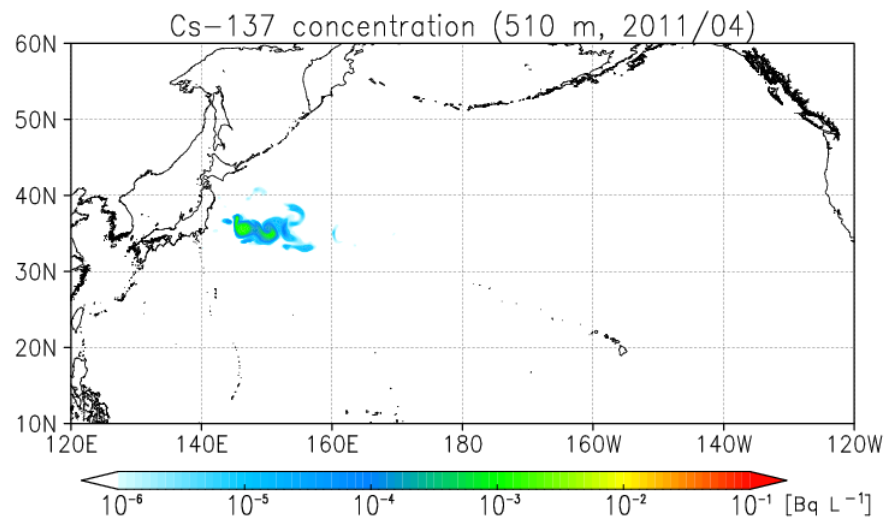
- 春季に混合層内でサブメソスケール渦に伴う強い鉛直流(非地衡二次流, ASCs)が発達
- 事故直後に発達していたASCsが ^{137}Cs 鉛直循環に強く関与していた可能性を示唆

太平洋における海水中の ^{137}Cs 分布 (2011年4月、2013年3月)

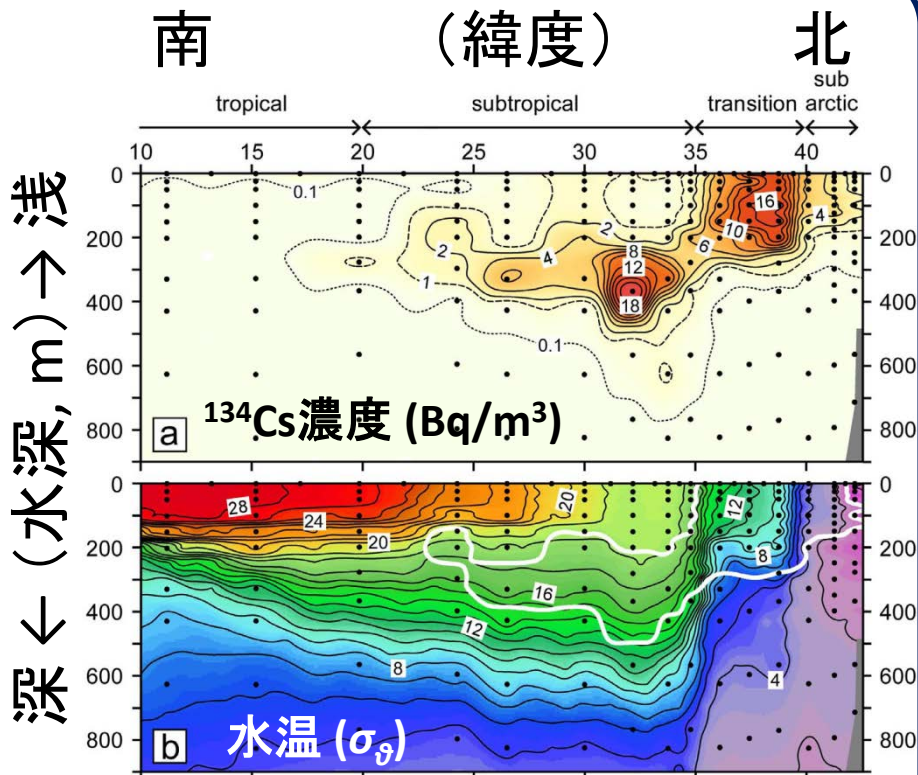


↑ 表層

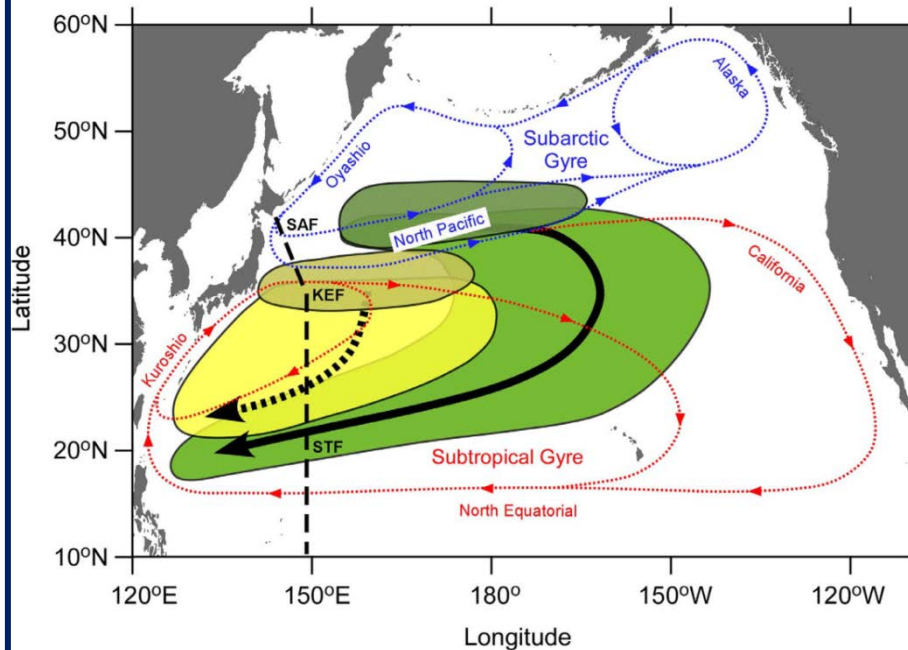
↓ 水深500m



沖合に運ばれた放射性Csはどこへ行くのか？



2011-2012冬季における ^{134}Cs 濃度と水温の南北断面(東経149度)



- 表層での動き(寒流)
- 表層での動き(暖流)
- 中層での動き(亜熱帯モード水)
- 中層での動き(中央モード水)

北太平洋における海水流動

海洋観測の様子

海洋地球観測船「みらい」MR-13-04航海より



操舵室



実験室



食堂と食事



前身は日本初の原子力船「むつ」

堆積物試料の採取

東北海洋生態系調査研究船
「新青丸」

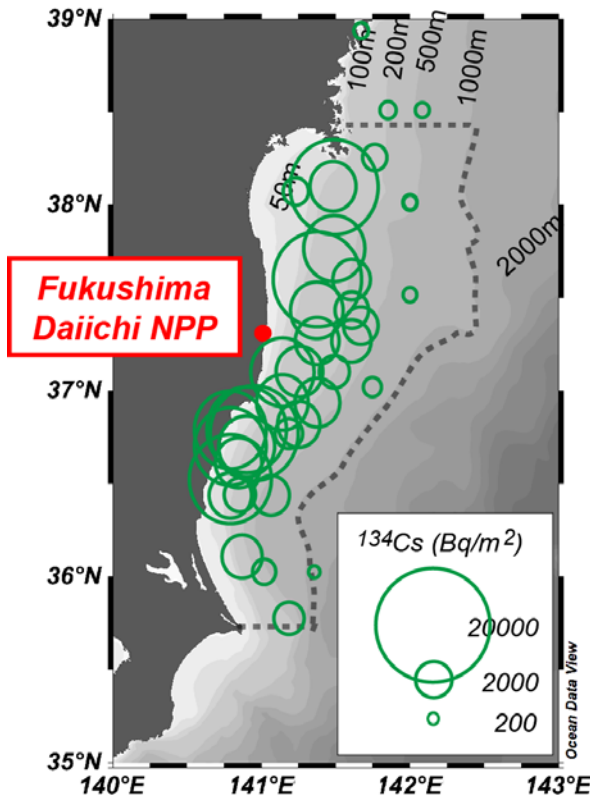


マルチプルコアラー(採泥器)

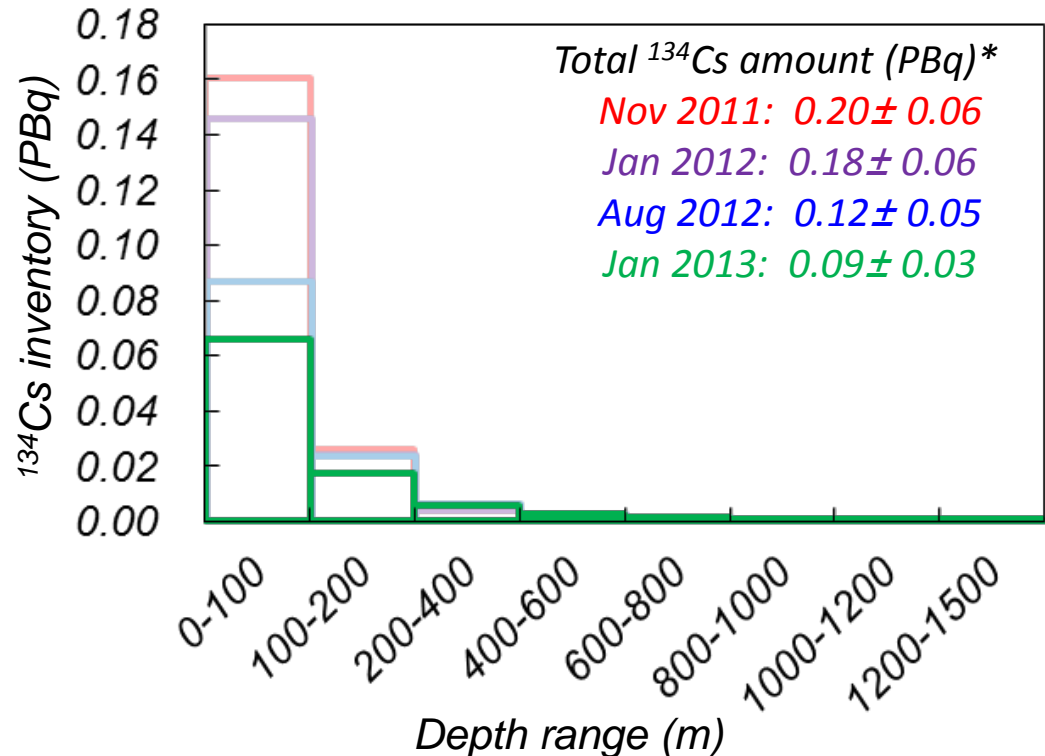


堆積物の切断作業

堆積物モニタリング –福島沖堆積物中¹³⁴Csの総量–



堆積物中¹³⁴Csの分布
(2013年2月: Bq/m²)

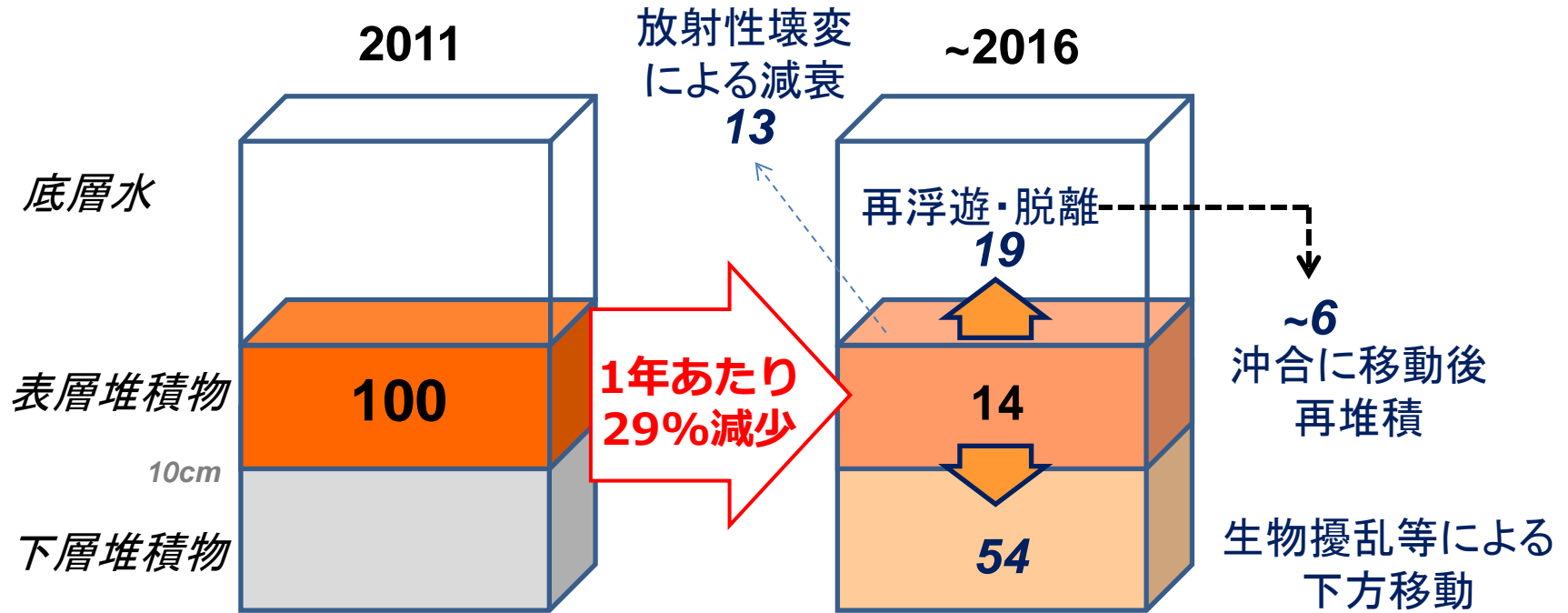


北緯 35° 40' ~ 38° 30' における堆積物中¹³⁴Cs
のインベントリ(PBq)*

- 汚染度の高い海水と堆積物との接触が主要な初期沈着過程と推測
- 海底に沈着した¹³⁴Csの95%は、沿岸域に存在
- 堆積物中の¹³⁴Cs存在量は緩やかに減少

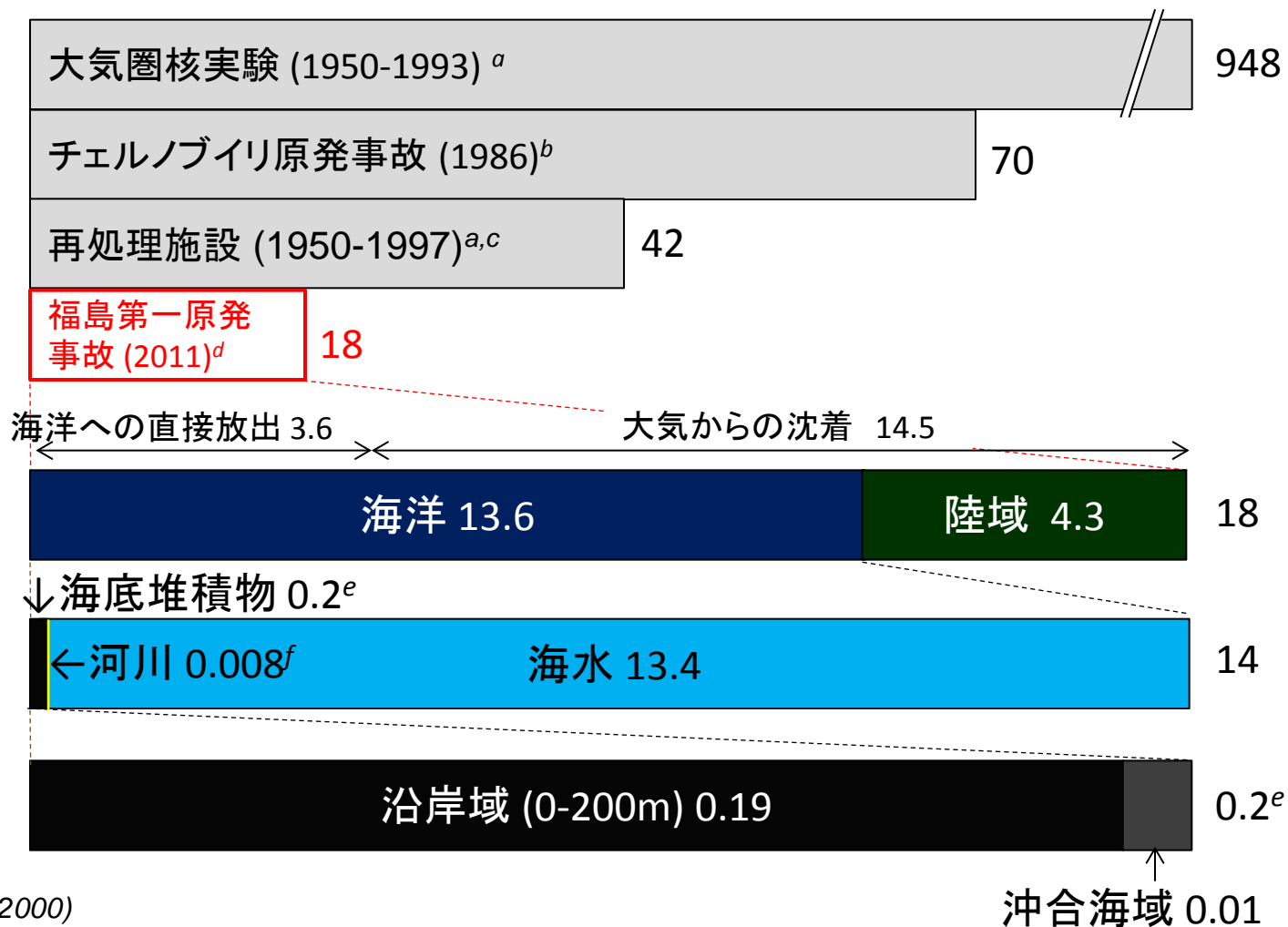
*Decay corrected to March 2011.

堆積物モニタリング -¹³⁷Csの存在量の時間変化-



福島沿岸(水深100m以浅)における,表層堆積物の¹³⁷Csの存在量の時間変化の模式図 (Otosaka, 2017 に基づき計算)

^{137}Cs の環境への放出量 (PBq = 10^{15}Bq)



^a UNSCEAR (2000)

^b UNSCEAR (1993)

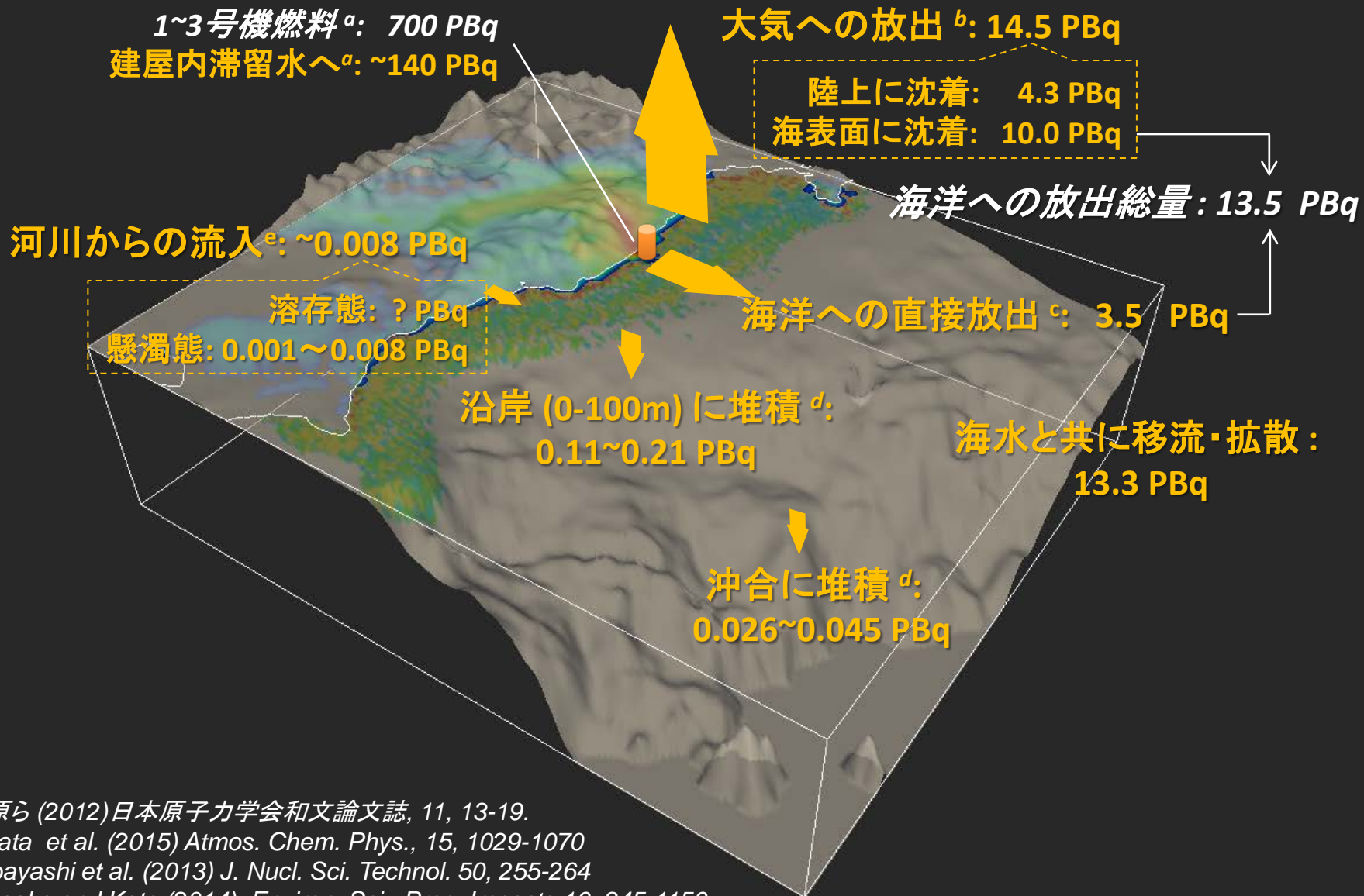
^c Smith et al. (1993) *J. Environ. Radioact.* 68, 193-214.

^d Katata et al. (2015) *Atmos. Chem. Phys.* 15, 1029-1070

^e Ootosaka and Kato (2014) *Environ. Sci.: Proc. Impacts* 16, 945-1156

^f Kitamura et al. (2014) *Anthropocene*, 5, 22-31; Yamaguchi et al. (2014) *J. Environ. Radioact.*, 135, 135を元に解析

2011年3月から11月における ^{137}Cs の動きと存在量 (PBq = 10^{15}Bq)



a 西原ら (2012) 日本原子力学会和文論文誌, 11, 13-19.

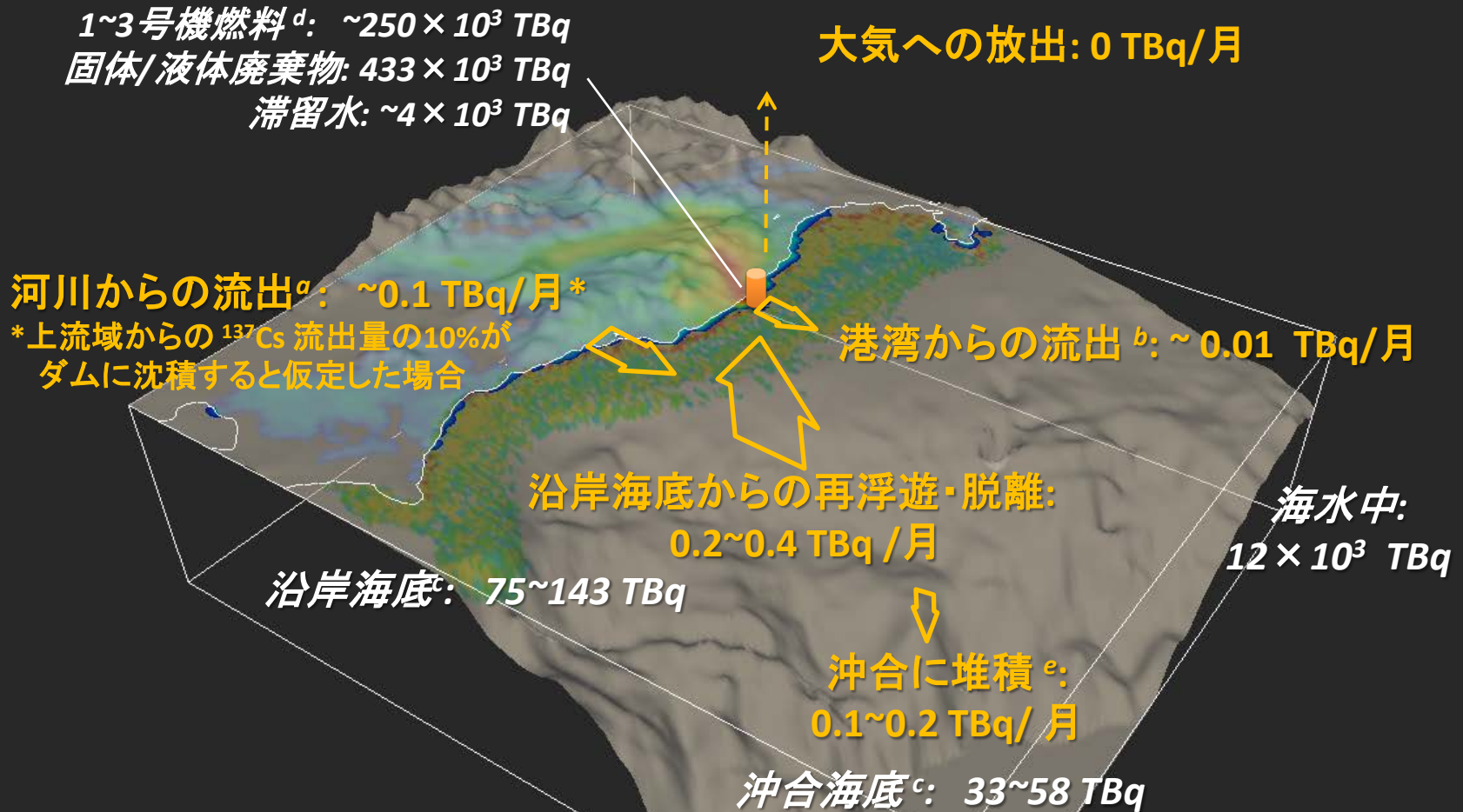
b Katata et al. (2015) Atmos. Chem. Phys., 15, 1029-1070

c Kobayashi et al. (2013) J. Nucl. Sci. Technol. 50, 255-264

d Otosaka and Kato (2014) Environ. Sci.: Proc. Impacts 16, 945-1156

e Kitamura et al. (2014) Anthropocene, 5, 22-31; Yamaguchi et al. (2014) J. Environ. Radioact., 135, 135を元に解析

2016年12月の ^{137}Cs の動きと存在量 (TBq = 0.001PBq = 10^{12}Bq)



a Kitamura et al. (2014) *Anthropocene*, 5, 22-31; Yamaguchi et al. (2014) *J. Environ. Radioact.*, 135, 135を元に解析

b 町田 (2017) 東京電力「福島第一原子力発電所周辺の放射性物質の分析結果」を元に解析

c Otosaka (2017) *J. Oceanography*, doi:10.1007/s10872-017-0421-5.

d 原子力規制庁 (2013) 特定原子力施設監視・評価検討会 (第15回) 資料. (2013年10月現在の値)

e Otosaka et al. (2014) *ES&T* 48, 12595-12902; Buesseler et al. (2015) *ES&T* 49, 9807-9816を元に解析

まとめ

- 東京電力福島第一原子力発電所から海洋へ放出された放射性物質の拡散解析
 - 沿岸の海洋モニタリング結果を比較的良好に再現することを確認
 - 4月上旬までに福島沿岸域で検出されていた高濃度の海水中放射性物質の多くは、黒潮続流により太平洋の沖へ速やかに輸送され、希釈された。
 - 溶存態Csの堆積物への直接接触により濃度上昇、8月までに固定された。
 - 堆積物中Cs濃度は海水中Cs濃度と比較して、ゆっくりと減少する。
 - 現在の海水中の放射能濃度は十分低い状態にある。
- 数値シミュレーションは、海洋モニタリングが実施されていない時間・海域の濃度を推定し、情報提供をすることが可能